



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO STANOVENÍ AXIÁLNÍCH
SIL VE ŠROUBOVÝCH SPOJÍCH**

DESIGN OF AN APPARATUS FOR AXIAL FORCES DETERMINATION IN SCREW CONNECTIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jiří Lečbých

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: Jiří Lečbych
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Konstrukce zařízení pro stanovení axiálních sil ve šroubových spojích

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při spojování součástí pomocí šroubových spojů, je velmi důležité, aby byl spoj dostatečně utažen a vzniklo tak potřebné předpětí. Nízké předpětí neplní funkci spoje, naopak příliš vysoké vede k porušení šroubu. Předpětí je zpravidla realizováno vyvozením předepsaného krouticího momentu. Moment však nemá přímou vazbu na sílu v předpětí, protože na vztah mezi momentem a silou předpětí mají významný vliv další faktory, zejména třecích charakteristiky. Návrh zařízení umožní kontrolu deklarovaných vlastností šroubů od různých dodavatelů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je návrh zařízení a metodiky pro měření axiální síly u metrických šroubových spojů M6, M8 a M10 dle normy ISO 16047 pro utahovací moment do 100 Nm.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- popsat metody a metodiky pro stanovení axiálních sil ve šroubových spojích,
- vypracovat koncepční návrhy možných řešení,
- navrhnout metodiku měření,
- rozpracovat vybraný návrh do podoby výkresové dokumentace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

GRABON, W.A., M. OSETEK a T.G. MATHIA. Friction of threaded fasteners. Tribology International. 2018, 118(1), 408-420. DOI: 10.1016/j.triboint.2017.10.014. ISSN 0301679X.

BICKFORD, J. H. An introduction to the design and behavior of bolted joints. 3rd ed., rev. and expanded. New York: Marcel Dekker, 1995. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 97. ISBN 978-0824792978.

ROARK, R. J., W. C. YOUNG, R. G. BUDYNAS a A. M. SADEGH. Roark's formulas for stress and strain. 8th ed. New York: McGraw-Hill, 2012. ISBN 978-0071742474.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem konstrukce zařízení pro měření axiálních sil ve šroubových spojích. Úvod práce je zaměřen na rešerši současného stavu poznání šroubových spojů, snímačů síly a metod vyvození předpětí včetně jejich kontroly. Z poznatků byly vytvořeny tři koncepční řešení splňující zadání práce. Výsledné konstrukční řešení, které nejvíce odpovídá realitě, je detailně popsáno včetně výhod konstrukce a možných nepřesností při měření. Konečný 3D model byl rozpracován do podoby výkresové dokumentace.

KLÍČOVÁ SLOVA

Utahovací moment, axiální síla, předpětí, šroubové spoje, ISO 16047

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design of the device for measuring axial forces in bolted joints. The first part of the thesis is focused on the research of the current state of knowledge of screw connections, force transducers and methods for deriving prestress including their control. Then, three conceptual solutions that fulfilled the assignment of the thesis were created based on the research. The final design that most closely corresponds to reality is described in detail including its advantages and possible measurement inaccuracies. The final 3D design was made into a drawing documentation.

KEYWORDS

Tightening torque, axial forces, preload, bolted joints, ISO 16047

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LEČBYCH, Jiří. Konstrukce zařízení pro stanovení axiálních sil ve šroubových spojích [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-05-23]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116304>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji panu doc. Ing. Petru Svobodovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce, trpělivost a ochotu při konzultacích. Dále bych rád poděkoval rodičům a blízkým za podporu během studia na vysoké škole.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně pod odborným vedením doc. Ing. Petra Svobody, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

V Brně, dne 17. 5. 2019

.....

Lečbych Jiří

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Historický vývoj šroubů	14
2.2	Šroubové spoje	15
2.2.1	Základní druhy šroubových spojů	15
2.3	Závity	16
2.3.1	Druhy závitů	16
2.3.2	Názvosloví závitů	17
2.3.3	Výroba závitů	18
2.4	Tenzometry	18
2.4.1	Polovodičové	19
2.4.2	Odporové	19
2.4.3	Rušivé vlivy při měření	20
2.4.4	Zapojení tenzometrů	20
2.4.5	Plnomostové zapojení	21
2.4.6	Piezoelektrické snímače	22
2.5	Metody vytvoření předpětí ve šroubovém spoji	22
2.5.1	Utahování pomocí klíče	22
2.5.2	Znamé prodloužení šroubu	22
2.5.3	Vytvoření předpětí momentovým klíčem	23
2.5.4	Vytvoření předpětí hydraulickým utahovákem	23
2.5.5	Vytvoření předpětí pneumatickým utahovákem	24
2.6	Metody kontroly předpětí	24
2.6.1	Indikační podložky	24
2.6.2	Speciální šrouby	25
2.6.3	Podle počtu otáček	26
2.6.4	Ultrazvuk	26
2.7	Silové poměry	26
2.7.1	Tření ve šroubových spojih	28
2.7.2	Tuhost spojovacích součástí – šroubů	29
2.7.3	Síly působící v předepjatém šroubovém spoji	30

2.8	Norma ISO 16047	31
2.9	Existující prototypy	32
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	36
3.1	Analýza problému	37
3.2	Cíl práce	37
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	38
4.1	Řešení A	38
4.2	Řešení B	39
4.3	Řešení C	40
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	42
5.1	Teoretický výpočet	42
5.1.1	Výpočet síly předpětí	42
5.1.2	Teoretický utahovací moment	43
5.1.3	Kontrola šroubu	44
5.2	Tenzometrický snímač	45
5.3	Nosný rám	46
5.4	Opěrné desky	47
5.5	Redukční podložky	47
5.6	Konečná konstrukce	48
5.7	Způsob utahování	49
5.8	Metodika měření	50
6	DISKUZE	51
7	ZÁVĚR	52
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	53
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	53
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	59
11	SEZNAM TABULEK	61
12	SEZNAM PŘÍLOH	62

1 ÚVOD

Šroubový spoj je jeden ze základních konstrukčních prvků. I v dnešní době tvoří šroubové spoje stále podstatnou část všech spojů. Používají se v mnoha průmyslových odvětvích především pro svou jednoduchou konstrukci a snadnou montáž. Avšak předpoklad pro správnou funkci spoje je jeho dostatečné utažení, a tím vyvození potřebného předpětí. Při nízkém předpětí nemůže spoj plnit svou funkci, a naopak vysoká hodnota předpětí může způsobit až deformaci šroubu. Problém vytvoření totožné hodnoty předpětí u dvou stejných šroubů od různých dodavatelů při použití stejného utahovacího momentu byl hlavním důvodem pro vznik této bakalářské práce.

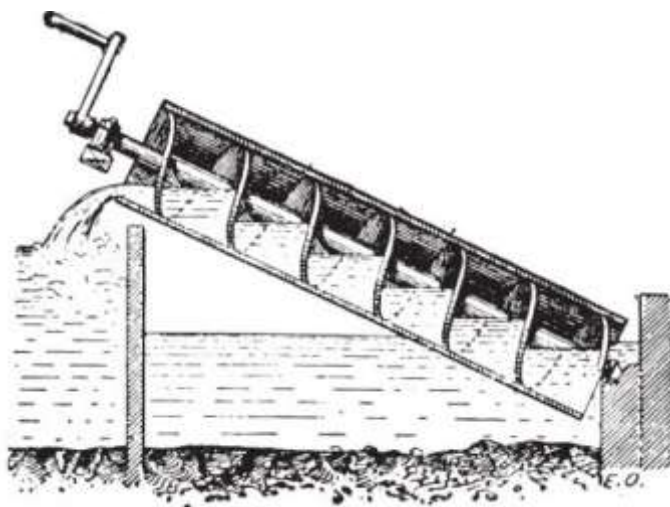
Nejčastějším způsobem kontroly předpětí je pomocí momentového klíče. Tato kontrola však není postačující, jelikož moment nemá přímou spojitost se silou předpětí. Vztah mezi momentem a silou předpětí je významně ovlivněn dalšími faktory, z nichž nejdůležitější roli hrají třecí charakteristiky. Pro přesné měření vyvozeného předpětí jsou ideální tenzometrické snímače spolu s vyhodnocovacím softwarem.

Vytvořený konstrukční návrh by měl pomoci zkvalitnit proces montáže, a tím předejít možnostem vzniku následných komplikací vlivem nedostatečné hodnoty předpětí.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

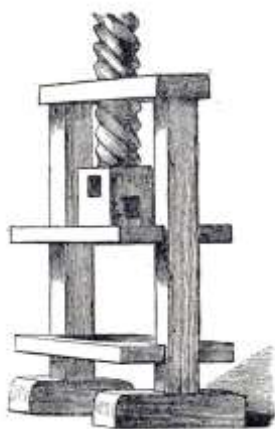
2.1 Historický vývoj šroubů

Šroubový závit byl vynalezen kolem 3. století př. n. l. Archimedesem (287 př. n. l. – 212 př. n. l., řecký fyzik, matematik, vynálezce – vynalezl tzv. Archimedův šroub). Tento šroub byl původně poprvé použit na čerpání odpadní vody na lodi Syrakúsie, brzy se však rozšířil i do dalších odvětví. Princip šroubu spočíval v šikmo uložené trubici, uvnitř které byla těsně uložena spirála. Voda byla čerpána pomocí gravitace a otáčení hřídele. [1]



Obr. 1 Archimedův šroub [2]

Postupem času spirála prošla evolucí a mnohem více se podobala dnešnímu závit. Tato spirála byla používána převážně v lisech na extrakci olejů z oliv. Základním výrobním materiálem bylo stále dřevo. [1]



Obr. 2 Starověký lis na olej [3]

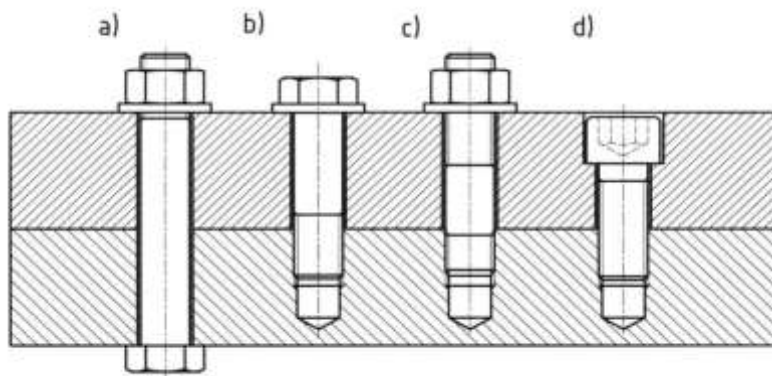
S postupem času a rozvojem i dalších odvětví se změnil základní materiál z dřeva na kov, který našel využití například i v hodinářství. Výsledná konstrukce šroubového závitu byla závislá na zručnosti a dovednosti jednotlivého řemeslníka. Kolem roku 1800, kdy s rostoucím použitím různorodých závitů, jež každý podnik vyráběl svůj vlastní typ závitu, byl kladen stále větší důraz na standardizaci. Tato potřeba se projevila hlavně při světových válkách, kdy nastala potřeba co největší zaměnitelnost součástí. [4]

2.2 Šroubové spoje

Šroubový spoj je jeden ze základních a univerzálních konstrukčních prvků, které se používají pro spojování konstrukcí. Spoj přenáší sílu směřující v ose šroubu. Patří mezi spoje rozebíratelné, tzn. že jsou charakterizovány snadným uvolněním bez jakéhokoli poškození jak na spojovaných, tak i na spojovacích součástech. Zároveň je lze opětovně spojit bez negativního narušení původních vlastností. Šroubový spoj patří do spoje se silovým stykem. Proto, aby byl spoj funkční, musí být dostatečně předepjat určitou silou. [5]

2.2.1 Základní druhy šroubových spojů

Na základě požadavků a kritérií můžeme šroubové spoje rozdělit podle typu použití.



Obr. 3 Přehled druhů šroubových spojů [28]

- a) spoj s šroubem a hlavou
- b) spoj zašroubovaný šroubem s hlavou
- c) spoj závrtným šroubem a maticí
- d) spoj šroubem s vnitřním šestihranem a zapuštěnou válcovou hlavou [28]

2.3 Závity

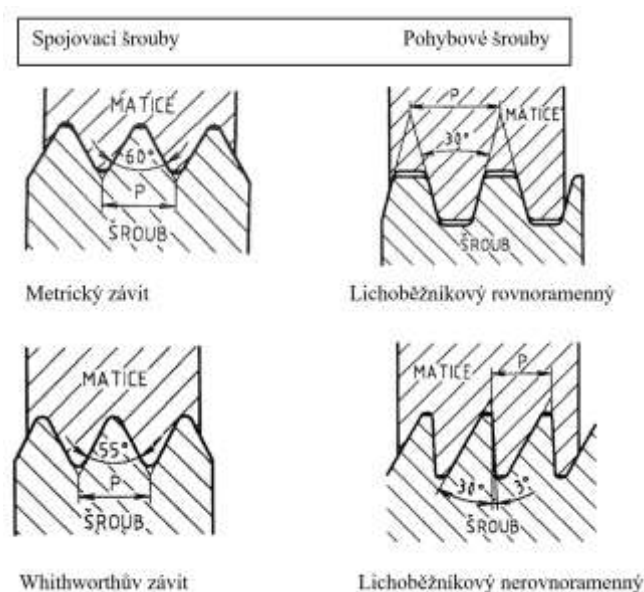
Závít je technický prvek strojní součásti, jehož tvar je určen závitovou plochou. Ta vznikne navinutím profilu na válec podél šroubovice v daném stoupání.

2.3.1 Druhy závitů

Normalizované závity lze rozdělit podle mnoha kritérií:

- | | |
|---------------------------|-------------------------|
| • polohy profilu | vnější
vnitřní |
| • smyslu vinutí | pravé
levé |
| • počtu závitových ploch | jednochodé
vícechodé |
| • tvaru základního tělesa | válcové
kuželové |
| • funkce | spojovací
pohybové |

Mezi nejpoužívanější spojovací závity patří metrický závit, jež má profil rovnostranného trojúhelníku s vrcholovým úhlem 60° . Můžeme rozeznat metrický závit s jemným a hrubým stoupáním. Dalším spojovacím závitem je Whitworthův závit či trubkový závit. Whitworthův závit se v České republice příliš nepoužívá, ale naopak ve Velké Británii, kde vznikl, je používán častěji.



Obr. 4 Přehled vybraných závitů [28]

U pohybových závitů je důležité, aby nedošlo ke splnění podmínky samosvornosti. Mezi pohybové závity se řadí převážně čtvercový, lichoběžníkový rovnoramenný a nerovnoramenný. S pohybovými šrouby se můžeme setkat například u soustruhů.

2.3.2 Názvosloví závitů

Termíny používané u závitů stanovuje norma ČSN 01 4001.

Základní profil – teoretický profil závitu v osově rovině, jež je určen rozměry a úhly. Tvar a rozměry jsou odvozeny z pravoúhlého trojúhelníku o výšce H

Rozteč P_h - vzdálenost mezi stejnohlými boky sousedních závitů

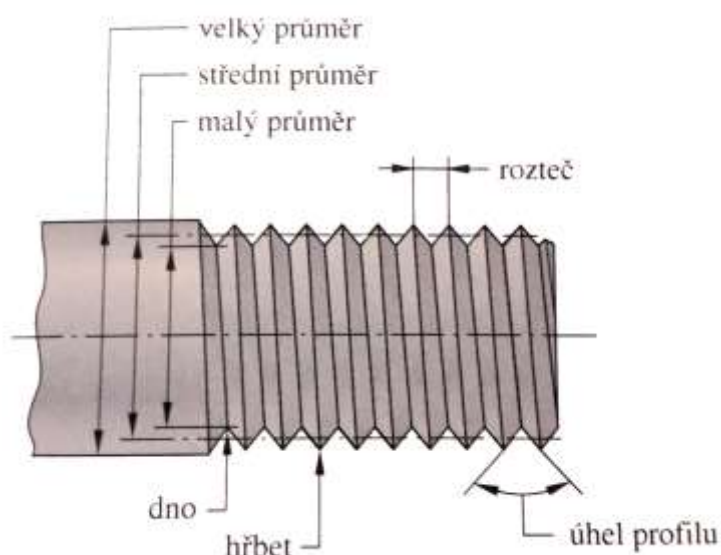
Jmenovitý průměr – průměr, k němuž se vztahují odchylky. Symbol d se používá pro označení průměru vnějšího závitu – šroubu. Symbol D se používá pro označení průměru vnitřního závitu – matice.

Velký průměr (šroub d , matice D) – průměr opsaného válce hřbetům vnějšího závitu, respektive vepsaného válce vnitřního závitu

Malý průměr (šroub d_1 , matice D_1) – průměr vepsaného válce dnům vnějšího, respektive opsaného válce vnitřního závitu

Střední průměr (šroub d_2 , matice D_2) – průměr myšleného válce souosého se závitem, jehož každá přímka protíná profil závitu tak, aby se průsečnice promítla do osy závitu o délce $P_h/2$

Úhel profilu závitu α – úhel, který svírají dva protilehlé boky profilu závitu [21]



Obr. 5 Základní terminologie závitu [21]

2.3.3 Výroba závitů

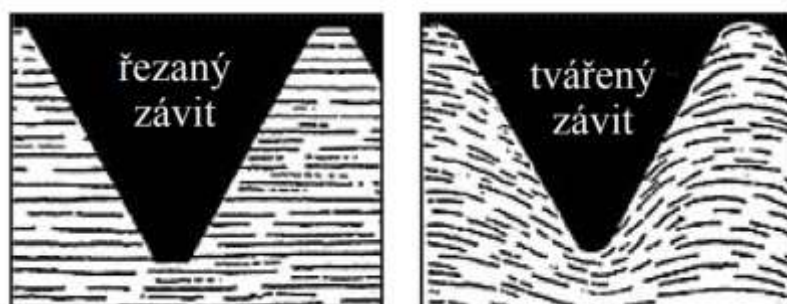
Mezi nejčastější způsob výroby závitů patří výroba řezáním, respektive frézováním a tvářením.

Tváření

Díky neodřezaným vláknům, ale naopak zhutněným povrchovým vláknům od tvářecího procesu, je únosnost závitů daleko vyšší a závity mají lepší kvalitu povrchu. Závit je možné tvarovat mnohem vyššími rychlostmi, přičemž tvářitelnost se u mnoha materiálů zvyšuje. Mez únavy se oproti řezaným závitům zvyšuje až na dvojnásobek. Rovněž je lepší odolnost vůči otěru, avšak negativum tohoto způsobu výroby je vyšší požadavek na přesnost předvrtané díry.

Řezání

Řezaný závit vznikne obráběním vnějších nebo vnitřních šroubových ploch tvarovým nástrojem za vzniku odpadní třísky. Mezi metody výroby závitů řezáním patří soustružení, broušení, závitníky a závitové hlavy. Na rozdíl od tvářeného závitů jsou vlákna přerušena. [7]



Obr. 6 Průběh vláken [29]

2.4 Tenzometry

Souvislost mezi deformací materiálu a působící silou v určité části byla objevena již v roce 1676 Robertem Hookem. Postupně byla zpřesňována do tvaru, jak jej známe nyní:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (1)$$

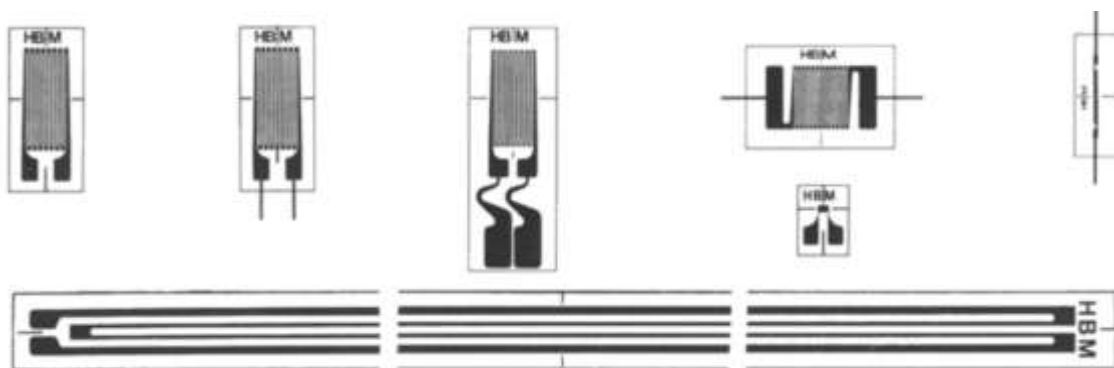
Hookův zákon je základním stavebním kamenem tenzometrických měření. Dříve používané optické, akustické či pneumatické tenzometry byly vytlačeny elektrickými tenzometry, a to polovodičovými nebo odporovými. [8]

2.4.1 Polovodičové

Základním měřeným parametrem je elektrický odpor R polovodičového tělesa, jež je přímo úměrný změně délky vodiče a jeho průřezu. Například protahujeme-li odporový drátek v rozmezí pružné deformace silou F , zvětší se jeho odpor úměrně jeho prodloužení. Aby změna odporu byla co největší, je nutné, aby i délka drátu byla co největší. Protože se změnou délky se mění i průřez vodiče a jeho měrný odpor, je skutečná změna odporu větší, než odpovídá prodloužení odporového drátku. Zvětšení odporu se vyjadřuje jako deformační citlivost, která je závislá na materiálu snímače. Polovodičové tenzometry se vyznačují závislostí na teplotě. Nyní se však v běžných aplikacích, především v integrovaných senzorech, používají polovodičové tenzometry s podstatně větší poměrnou deformační citlivostí. Jejich nevýhodou je však velká teplotní závislost a citlivost na světlo. [9]

2.4.2 Odporové

V minulosti se používaly tenzometry s kovovými drátky, ty však byly vytlačeny tenzometry foliovými. Nevýhodou drátkových tenzometrů je omezená dosažitelná hodnota odporu. Rovněž se oproti polovodičovým tenzometrům vyznačují linearitou a větší přesností. Odporové tenzometry se vyrábějí z materiálu, nejčastěji z konstantanu, který se vyznačuje dobrou odolností vůči změně teploty. V současné době nejčastěji používaným kovovým tenzometrem je tenzometr foliový, u něhož probíhá měření přes mřížku, jež je napařena případně difundována přímo na podložku. Velkou výhodou je libovolný tvar mřížky, který se nejčastěji vytváří pomocí leptání. [10]



Obr. 7 Tvarová a délková variabilita měřící mřížky [10]

2.4.3 Rušivé vlivy při měření

Okolní podmínky neovlivňují pouze tenzometr, ale i měřící místo. Teplota má podstatný vliv na přesnost měření. Vysoké rozdíly teplot zapříčiňují změnu vodivosti materiálu tenzometru, ale i teplotní roztažnost tenzometru. Nejčastěji používanou metodou pro minimalizaci vlivu teploty je kompenzace pomocí vhodného zapojení tenzometrů do můstku. Rovněž napájecí proud tenzometru musí být vhodně zvolen tak, aby byl tenzometr ovlivněn teplotou pouze minimálně.

V případě, kdy je tenzometr dlouhodobě staticky zatížen, tak po delší době dochází k poklesu měřeného zatížení vlivem materiálových vlastností jednotlivých vrstev.

Hystereze, tedy rozdíl v hodnotě naměřeného odporu při vzrůstu a následném poklesu přetvoření na předešlou úroveň přetvoření, je u tenzometru minimální. Naopak větší hysterezi může mít materiál umístěný pod tenzometrem.

Vlhkost může stejně tak jako teplota způsobit komplikace. Změna vlhkosti během měření má vliv na deformační citlivost tenzometru. Vlhkost proniká přes izolaci a snižuje odpor mezi tenzometrem a měřeným místem. Stejně jak měřící mřížka mění s obsahem vody své rozměry, tak i některá lepidla mohou měnit s vlhkostí své vlastnosti.

Elektrické napětí vzniklé proměnným magnetickým polem lze snadno redukovat odstíněním měřícího obvodu včetně přívodní kabeláže. [10]

2.4.4 Zapojení tenzometrů

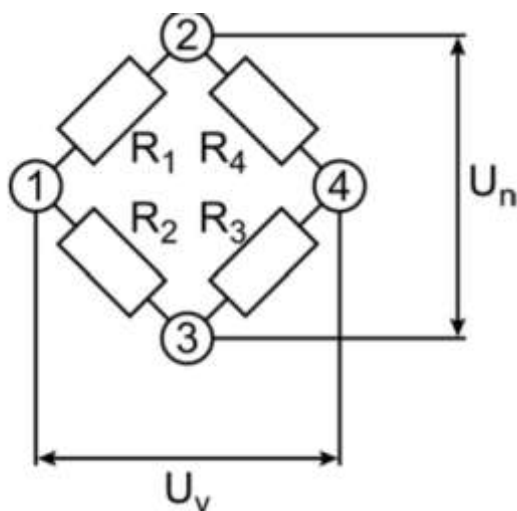
Pro velmi přesné měření pomocí tenzometrů nevyhodnocujeme celkovou hodnotu odporu, ale pouze její změnu. Pro měření této změny zapojujeme tenzometry do Wheatstonova můstku. V současné době mezi nejobvyklejší zapojení patří:

- Čtvrtmostové
- Půlmostové
- Plnomostové

2.4.5 Plnomostové zapojení

Tento způsob zapojení se používá pro nejpřesnější měření a dlouhodobou opakovatelnou stabilitu. Každé ze čtyř ramen můstku je osazeno tenzometrem s totožnou hodnotou odporu, díky čemu nejvíce minimalizujeme míru nelinearity měření. Jestliže na deformační člen nepůsobí žádná síla, tak výsledné napětí bude $U=0$ a můstek se nachází ve vyváženém stavu. Změna výstupního napětí (2) je dána rozdílem hodnot jednotlivých odporů. Tento rozdíl je způsoben délkovým přetvořením nebo změnou teploty, díky čemuž je tenzometr teplotně kompenzován. [10]

$$U_v = \frac{i_s}{(R_1 + R_2 + R_3 + R_4)} \cdot (R_1 R_3 + R_2 R_4) \quad (2)$$



Obr. 8 Wheatstonův můstek napájený konstantním napětím [10]

Všechny další již uvedené typy schémat zapojení jsou pouze odvozené od tohoto.

2.4.6 Piezoelektrické snímače

Piezoelektrické snímače jsou založené na principu piezoelektrického jevu. Tento jev spočívá na schopnosti krystalu generovat elektrický náboj při deformaci, tedy převádí měřené veličiny, například tlak, teplota a napětí, na elektrický náboj. Senzory lze používat i v režimu nepřímého piezoelektrického jevu, kdy je krystal mechanicky deformován v elektrickém poli. Tohoto obráceného jevu se v praxi využívá u rezonátorů a aktuátorů. Základním materiálem krystalu je křemen nebo piezoelektrická keramika. Velkou výhodou těchto snímačů je relativně vysoká odolnost vůči teplotám. [11]

2.5 Metody vytvoření předpětí ve šroubovém spoji

2.5.1 Utahování pomocí klíče

V minulosti se předpětí ve šroubovém spoji realizovalo použitím šroubových klíčů. Velikost vytvořeného předpětí záležela čistě na citu obsluhy, takže se výsledky značně lišily. Často se stávalo, že šroub nebyl dostatečně utažen, a tak nevzniklo žádné předpětí.

2.5.2 Známé prodloužení šroubu

Pokud během utahování lze přesně měřit celkovou délku šroubu, pak můžeme vypočítat velikost předpětí ve šroubu pomocí rovnice:

$$\delta = \frac{F_i \cdot l}{E \cdot S} \quad (3)$$

Šroub je dotahován, dokud nedosáhne prodloužení δ . Tento způsob vytvoření předpětí má značně omezené použití, protože v mnoha případech nelze přímo změřit prodloužení šroubu.

2.5.3 Vytvoření předpětí momentovým klíčem

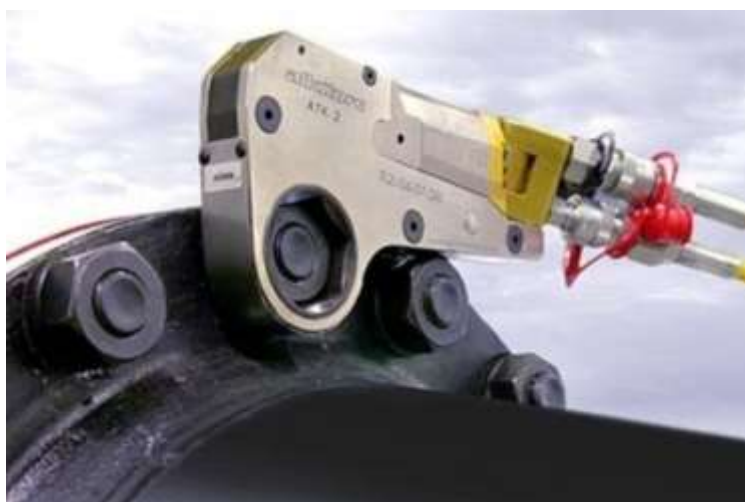
Jedná se o speciální utahovací klíč, jež obsahuje mechanismus s nastavitelným utahovacím momentem se specifickým rozsahem. Na klíči se nastaví požadovaná hodnota utahovacího momentu. Po dosažení hodnoty klíč signalizuje nejčastěji vypnutím s nemožností dalšího dotahování, anebo akusticky. V dnešní době existují momentové klíče s digitálním displejem ukazující okamžitou hodnotu utahovacího momentu. Přesnost vyvozeného předpětí se odvíjí od velikosti použité řady. U nižších řad se pohybuje kolem 25 %.



Obr. 9 Momentový klíč [26]

2.5.4 Vytvoření předpětí hydraulickým utahovákem

Hydraulické utahováky disponují širokým rozsahem kroutícího momentu od 100 Nm až po 150 000 Nm. Nutností je ale disponovat odpovídajícím vysokotlakým hydraulickým čerpadlem. Používají se převážně pro největší šrouby s požadavkem na vysokou upínací sílu. Přesnost utahování se pohybuje v rozmezí 1 % - 5 %.



Obr. 10 Hydraulický utahovák [27]

2.5.5 Vytvoření předpětí pneumatickým utahovákem

Vhodný je spíše pro větší průměry šroubů a pro vyvození větších utahovacích momentů. Je nutností mít k němu příslušnou pneumatickou jednotku, jež zásobuje pneumatický utahovák stlačeným vzduchem. Princip je čistě mechanický, kdy motor převádí ze stlačeného vzduchu energii na rotační pohyb. Výhodou je relativně vysoká rychlost utahování, ale i povolování. Velikost utahovacího momentu je závislá na použitém zařízení; pohybuje se kolem 20 000 Nm s přesností 6 %.



Obr. 11 Pneumatický utahovák [27]

2.6 Metody kontroly předpětí

2.6.1 Indikační podložky

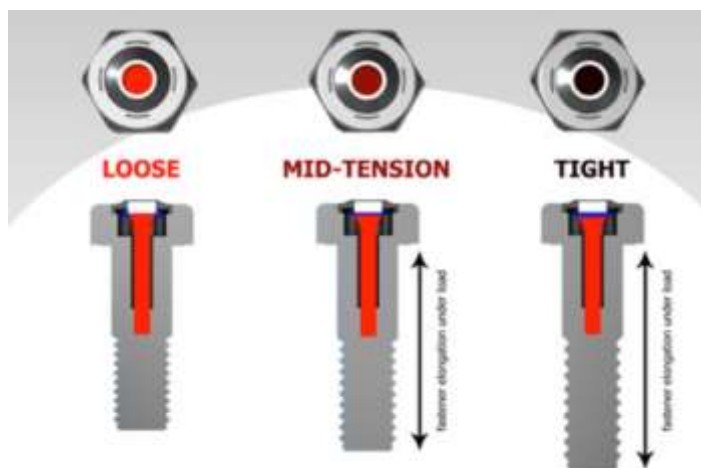
Tyto speciální podložky jsou na jedné ploše vybaveny výstupky o přesné výšce. Mohou být umístěny jak pod matici, tak i pod hlavu šroubu. Během procesu utahování se tyto výstupky plasticky deformují, a tím se i snižuje prostor mezi podložkou a spojovací součástí. Následně po vložení plechové měrky lze dopočítat hodnotu vyvozeného předpětí. I po úplném dotažení každá podložka garantuje minimální hodnotu předpětí. Podložky ukazují pouze sílu v axiálním směru, nejsou vázány na utahovací moment. Na trhu jsou také k dostání Squirter DTI podložky. Jedná se o určitou modifikaci, kdy dutiny v podložce obsahují oranžový silikon. Po správném dotažení tento silikon vystříkne na povrch spojované součásti a na první pohled dává jasně najevo, že je šroub dostatečně předeprnut. [12]



Obr. 12 Squirter DTI podložky [12]

2.6.2 Speciální šrouby

Jedná se šroub s obchodním označením SmartBolts®. Tento šroub umožňuje vizuálně kontrolovat, zda je šroubový spoj dostatečně předepnut. Měření délkového prodloužení okamžitě transformuje na vizuální zobrazení změnou barvy na hlavě šroubu v reálném čase. Rovněž umožňují opakovanou použitelnost. Šrouby SmartBolts jsou konstruované k indikaci předpětí na 70 % meze kluzu. Výhodou je jednoduchost použití bez potřeby speciálních přípravků. Přesnost se pohybuje v rozmezí 10 %. [13]



Obr. 13 Schéma šroubů SmartBolts [13]

2.6.3 Podle počtu otáček

Pro použití této metody je nutností definovat pojem těsné utažení. Je to poloha, kdy je šroub dotažen, avšak je vyvozeno nulové předpětí. Od této polohy otočením o předem vypočítaný počet otáček, resp. úhel dojde k vyvolání požadovaného předpětí. Tato metoda není příliš efektivní, a i přesnost není vysoká. [21]

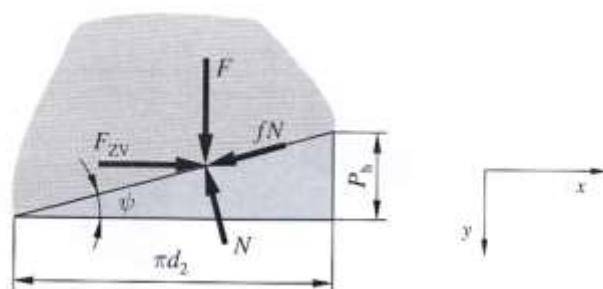
2.6.4 Ultrazvuk

Velikost předpětí lze také měřit pomocí ultrazvuku. Nejdříve se změří šroub bez zatížení. Ultrazvukový signál projde z jedné strany až na konec šroubu a poté zpět do senzoru. Poté se změří šroub v zatíženém stavu. Během utahování se mění délka šroubu, zvyšují se velikosti napětí, tím pádem se mění rychlost zvuku, resp. čas průchodu signálu. Tyto hodnoty se porovnají s hodnotami v nezatíženém stavu a zařízení ukáže velikost předpětí. Přesnost této metody se pohybuje kolem 1 %. [25]

2.7 Silové poměry

Během procesu utahování je šroub namáhán na tah od síly předpětí a také na krut od utahovacího momentu. Moment při utahování je rozdělen na dvě části, jedna část namáhá drápek šroubu a druhá část překonává tření mezi hlavou šroubu a povrchem spojované součásti či podložky.

Na Obr.14 je zobrazen rozvinutý jeden závit šroubu o délce jedné otáčky matice. Základnu vzniklého trojúhelníku tvoří obvod kružnice, výška je rovna stoupání a závit reprezentuje přeponu. Síla potřebná pro utažení je F_{ZV} a její působíště je doprava. Třecí síla je orientovaná vždy proti pohybu.



Obr. 14 Rozbor působících sil při utahování [21]

Jestliže je soustava ve statické rovnováze, tak pro ni platí:

$$\sum F_X = F_{ZV} - N \sin\psi - f N \cos\psi = 0 \quad (4)$$

$$\sum F_Y = F + f N \sin\psi - N \cos\psi = 0 \quad (5)$$

Po úpravě vznikne potřebná síla pro utažení:

$$F_{ZV} = \frac{F(\sin\psi + f \cos\psi)}{\cos\psi - f \sin\psi} \quad (6)$$

Po vydělení rovnice (6) $\cos\psi$ a použití vztahu $\tan = \frac{P_h}{\pi d_2}$ vznikne:

$$F_{ZV} = \frac{F(f + \frac{P_h}{\pi d_2})}{1 - \frac{f P_h}{\pi d_2}} \quad (7)$$

Výsledný utahovací moment je pouze součinem F_{ZV} a délky ramena, respektive $d_2/2$:

$$M_{ZV} = \frac{F d_2}{2} \left(\frac{P_h + \pi f d_2}{\pi d_2 - f P_h} \right) \quad (8)$$

Toto odvození platí pouze pro čtvercový závit. Pro závity, jejichž boky svírají nenulový úhel, je nutná úprava. Normálová síla je odkloněna a zvětšena, tudíž je zvětšena i třecí síla a musí se vydělit $\cos(\frac{\alpha}{2})$. Upravený vztah vypadá následovně:

$$M_{ZV} = \frac{F d_2}{2} \left(\frac{P_h \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \pi f d_2}{\pi d_2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - f P_h} \right) \quad (9)$$

Aby byl šroub samosvorný, tak výsledný M_{ZV} musí být kladný, tedy:

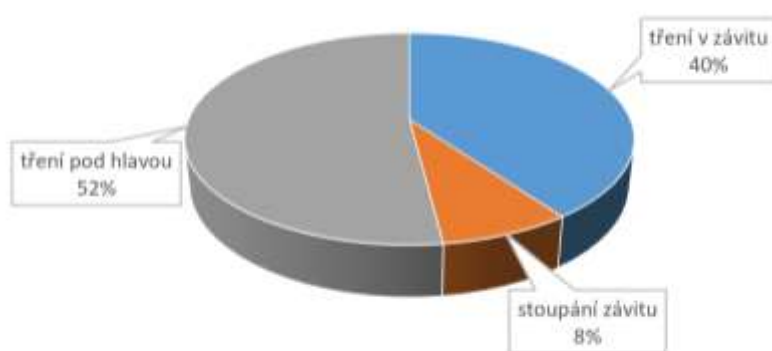
$$\pi f d_2 > P_h \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (10)$$

Při návrhu a kontrole šroubu se dále počítá moment potřebný pro překonání na dosedací ploše, tedy mezi hlavou šroubu a spojované součásti:

$$M_o = \frac{F f_0}{2} \cdot \frac{D + d}{2} \quad (11)$$

2.7.1 Tření ve šroubových spojkách

Tribologické jevy, ke kterým dochází na rozhraní spojovacích prvků, způsobují to, že hodnota točivého momentu není během procesu utahování konstantní. Koeficient tření pod hlavou šroubu má největší dopad na napětí ve šroubu. Hlavní problém při použití metody utahování na základě točivého momentu pro nepřímé řízení upínací síly je, že jen malá část točivého momentu se skutečně použije k utažení šroubu. Většina je absorbována na tření mezi čelní částí hlavy šroubu a v závitě. Povrchové úpravy nebo speciální povlaky jsou také velmi důležité pro provozní vlastnosti šroubu. Způsob, jak nejvíce minimalizovat rozdíly hodnot upínací síly, je použitím maziva. Aplikací vhodného maziva s nízkým koeficientem tření je možné dosáhnout mnohem vyšší hodnoty předpětí se stejným kroutícím momentem. [30]



Obr. 15 Poměr složek utahovacího momentu [30]

2.7.2 Tuhost spojovacích součástí – šroubů

Během utahování šroubu se šroub prodlužuje, stlačují se spojované součásti a ve šroubu je vyvozena síla předpětí. Síla předpětí je ve spoji vyvozena již během utahování ještě před působením provozní síly. Pro výpočet návrhu a kontroly předepjatého šroubu je podstatné znát jeho tuhost. Šroub je obecně složen z hlavy šroubu, dříku a závitové části. Tuhost se stanovuje z tuhosti hladké válcové části dříku a z tuhosti závitové části. Z hlediska výpočtového modelu nahrazujeme šroub sériově řazenými pružinami. Tyto teoretické výpočty však neberou v potaz deformaci matice a hlavy šroubu.

Čím větší tuhost šroubu, tím je úhel φ_s větší, a tedy i přímka v pracovním diagramu strmější Obr.16. Se zvyšující se tuhostí šroubu je přenášena větší částí provozní síly a šroub je mnohem více namáhán. Je žádoucí, aby byl spoj navrhován s co největším poměrem tuhostí spojovaných součástí a šroubů. Navrhují se tedy tuhé příruby a poddajný šroub. V ideálním případě může spojovaná součást přenést až 80 % provozního napětí. Poddajnost lze zvýšit změnou materiálu, zeslabením v určité části či prodloužením dříku. [21]

Výpočet tuhosti šroubu:

$$k_s = \frac{S_d \cdot A_s \cdot E}{S_d \cdot l_b + A_s \cdot l_g} \quad (12)$$

A_s – výpočtový průřez šroubu

S_d – plocha průřezu válcové části bez dříku

l_b – délka části dříku se závitem nacházející se v sevření

l_g – délka válcové části dříku bez závitu

E – modul pružnosti v tahu

Tuhostní konstanta spoje:

$$C = \frac{k_s}{k_s + k_p} \quad (13)$$

Celková síla ve šroubu v provozním stavu:

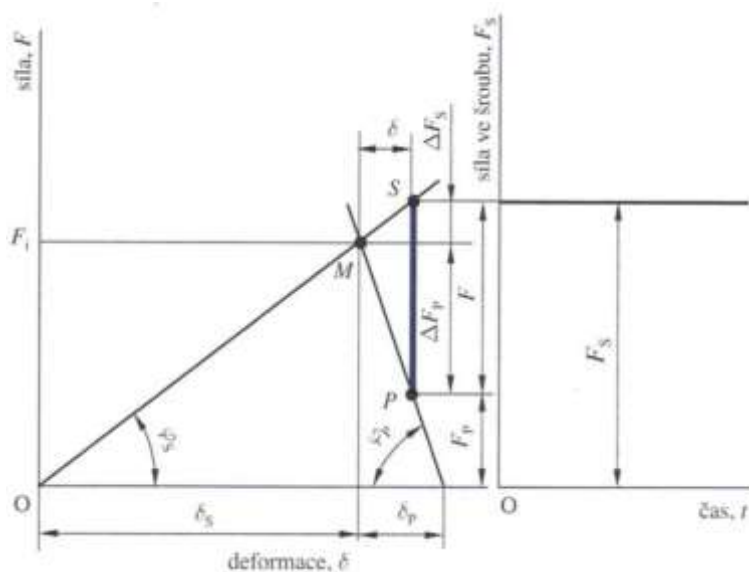
$$F_s = F_i + C \cdot F \quad (14)$$

Celková síla ve spojovaných součástech v provozním stavu:

$$F_p = F_i - (1 - C) \cdot F \quad (15)$$

2.7.3 Síly působící v předepjatém šroubovém spoji

Během návrhu předepjatého šroubového spoje bereme v potaz pouze tahové zatížení od provozní síly. Na obr. je vyobrazen montážní a pracovní diagram předepjatého šroubového spoje, kdy provozní síla má v čase konstantní velikost. Index S náleží pro šroub a index P pro spojovanou součást. Tangenta úhlu φ_s odpovídá tuhostní charakteristice šroubu k_s a φ_p tuhostní charakteristice spojované součásti – podložky k_p . Po vyvození předpětí o určité velikosti (bod M) je šroub zatížen provozní silou, kdy se šroub prodloužil o délku δ_s a deska se stlačila o δ_p . Při deformaci sigma bod S reprezentuje provozní stav ve šroubu a bod P provozní stav ve spojované součásti.



Obr. 16 Pracovní diagram předepjatého šroubového spoje s konstantní velikostí provozní síly [21]

2.8 Norma ISO 16047

Tato mezinárodní norma stanovuje postup a podmínky pro provádění zkoušek krouticího momentu, respektive upínací síly na spojovacích součástech se závitem. Vztahuje se na šrouby a matice z uhlíkové a slitinové oceli s metrickým závitem ISO velikosti M3 až M39, jejichž mechanické vlastnosti jsou specifikovány v ISO 898-1, ISO 898-2 nebo ISO 898-6.

Zkouška by měla probíhat za pokojové teploty nebo v rozmezí 10-35 °C, přičemž teplota zkušebních součástí musí být rovna pokojové teplotě. Zkušební zařízení by mělo splňovat následující předpoklady: možnost automatického nebo manuálního aplikování utahovacího momentu s konstantní frekvencí otáčení. Tuhost zkušebního zařízení, včetně siloměrů a zkušebního upínacího přípravku, by měla být během zkoušky konstantní. Dále konstrukce musí být vybavena senzory pro měření veličin upínací síly, utahovacího momentu a úhlu natočení. Zkušební matice nebo šroub musí být zajištěn proti otáčení.

Ze všech zkušebních součástí musí být odstraněny všechny zbytky mazacího tuku a jiných nečistot. Dále musí být odmaštěny pomocí vhodných roztoků nebo pomocí ultrazvuku.

Zkušební podložka musí být kalená s vysokou tvrdostí 50-60 HRC, drsností nepřevyšující $0,5 \pm 0,3$, bez povrchové úpravy, bez povlaku a odmaštěna. Rovněž nesmí obsahovat žádné otřepy a díry nesmí mít jakékoliv sražení či zahloubení.

Při zkoušce šroubu třídy pevnosti 10.9 musí být použita zkušební matice třídy pevnosti 10. Povrchy musí být opět odmaštěny a očištěny. Aby bylo možné zachovat opakovatelnost, smí být zkušební matice použita pouze jednou. [31]

2.9 Existující prototypy

Motorized Torque Test Stand Model TSTM-DC

Jedná se o výrobek společnosti MARK-10 - vertikální tester krouticího momentu. Tento přístroj je velmi variabilní a nabízí široký výběr příslušenství pro přizpůsobení každému odvětví, například od měření torzní tuhosti pružiny až po moment utažení nápojové PET láhve. Velikost krouticího momentu dosahuje až 22 Nm. Součástí přístroje je snímač a ukazatel točivého momentu, software a dvě základní desky umožňující uchopení testované součásti. Tento model nedisponuje schopností měřit axiální sílu, ale pouze točivý moment. Cena stanovena výrobcem je 7 450 \$. [15]



Obr. 17 Zkušební aparatura Model TSTM-DC [15]

Wance ETT104A

Toto torzní testovací zařízení, které je navrženo pro zkoušku utahovacího momentu včetně upínací síly a součinitele točivého momentu, je vyráběno čínskou společností Wance. Konstrukce přístroje a celý proces měření je navržen v horizontální rovině. Možnost testovat šrouby od velikosti M12 až po M56 nabízí širokou variabilitu a velký rozsah použití. Konstantní utahovací moment je vyvozen převodovým systémem, který je poháněn servomotorem střídavého proudu bez možnosti nastavení rychlosti. Rozsah měření krouticího momentu je od 100 Nm až po 1000 Nm s přesností měření až 0,002 Nm. Jako nevýhodu lze považovat celkové rozměry konstrukce 1400x750x2700mm nebo hmotnost převyšující 1800 kg. Cena není oficiálně zveřejněna. [16]



Obr. 18 Stroj Wance ETT104A [16]

Přípravek pro studium axiálních sil ve šroubech

Autorem tohoto přípravku je doc. Ing. Petr Svoboda, Ph.D. a Ing. Miloslav Zimmermann. Jedná se o prototyp vyrobený na zakázku pro společnost POKORNÝ, spol. s r.o. Rozsah použití měřených šroubů je M20, M30 a M42. Velikost axiální síly je snímána vlastnoručně vyrobeným snímačem osově síly, který je pro větší přesnost zapojen do plného můstku. Krouticí moment je aplikován pomocí hydraulických utahováků. Hodnota krouticího momentu je důmyslně měřena tenzometrickým snímačem umístěným v určité vzdálenosti od osy šroubu. Software na základě velikosti síly a vzdálenosti dopočítá hodnotu aplikovaného krouticího momentu. Zařízení má sice limitovanou variabilitu testování velikostí šroubů, ale jeho velkou předností je kompaktnost celé konstrukce zařízení a jednoduchá obsluha. [17] Pravděpodobnou odchylku při měření může způsobit fakt, že měřený je pouze jeden šroub. Během utahování je vrchní deska opřena o zbylé dva rozpěrné válce, a tedy vzniká neměřený odpor vůči stlačení.



Obr. 19 Přípravek pro měření šroubů M20, M30 a M42 [17]

NPS-5020 Online Bolt Torque Axial Force Testing Machine

Toto zařízení je konstruované k testování axiální síly a točivého momentu pro upevnění náboje kola na osobní automobil. Základem je horizontálně uložený vysokotuhostní rám. Zařízení dokáže vyvinout maximální krouticí moment 500 Nm, přičemž maximální měřitelná axiální síla je až 200 kN. Průběh zkoušky a okamžité hodnoty, včetně koeficientu točivého momentu, jsou zobrazeny na LED displeji. Délka testovaných šroubů je od 35 mm až do 200 mm. Motor je napájen střídavým proudem o napětí 220 V. [22]



Obr. 20 NPS-5020 včetně příslušenství [22]

YJZ-500E

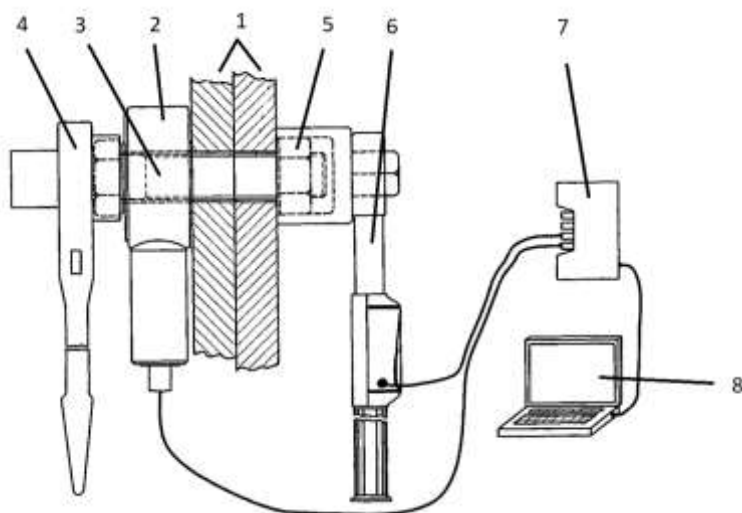
Výrobce této měřicí stanice je čínská společnost NAKE. Testování probíhá opět v horizontální rovině. Velikost testovaných šroubů je zaměřena spíše na šrouby většího průměru, konkrétně od M16 po M30 v délkách od 65 mm až po 280 mm. Výrobce uvádí rozsah snímání axiální síly od 20 N po 500 kN a utahovací moment až 2 000 Nm. Průběh zkoušky je vyhodnocován a zobrazen pomocí počítače a příslušného dodaného softwaru. Výrobce garantuje odchylku při opakovaném měření maximálně 1 %. Oficiální cena výrobku je 13 727 \$. [23]



Obr. 21 Měřicí sestava včetně vyhodnocovacího počítače [23]

Přístroj pro měření axiální síly šroubu

Jedná se patent na nástroj pro měření axiální síly ve šroubovém spoji. Autoři tohoto patentu jsou Hiroshi Taniguchi a Kenji Yamane. Jak lze vidět na schématickém obrázku Obr. 22, měření probíhá přímo na spojovaných součástech (1). Jako snímač zatížení je zde zvolena tenzometrická podložka (2), která je umístěna mezi hlavou šroubu (3) a spojovanou součástí. Axiální síla je zde vyvozena utahováním matice šroubu (5) a samotný šroub je zajištěn proti rotaci ručně ráčnovým klíčem (4). Uťahovací moment je zde vytvářen momentovým klíčem s vestavěným tenzometrem (6) pro měření krouticího momentu. Výstupy z tenzometrické podložky a momentového klíče jsou vedeny přes převodník (7) do počítače (8), jež zjištěná data zpracuje a vyhodnotí. [35]



Obr. 22 Patent pro měření axiální síly ve šroubu [35]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Podle doposud zjištěných poznatků o problematice šroubových spojů se jeví jako hlavní problém vytvořit totožnou axiální sílu u dvou šroubů při využití stejného utahovacího momentu. Příkladem výskytu tohoto jevu jsou příruby armatur, které jsou spojeny po obvodu více šrouby. Není-li předpětí u všech šroubů shodné, je ohrožena funkčnost spojů a tím i dostatečná těsnost. Tomuto stavu lze předejít kontrolou dostatečného předpětí využitím momentového klíče. Jelikož vztah mezi utahovacím momentem a axiální silou nemá přímou úměru, tak tato kontrola není plně postačující. Množství okolních faktorů, zejména tření, dokáže ovlivnit výslednou axiální sílu v každém šroubovém spoji.

3.2 Cíl práce

Cílem práce je navrhnout zařízení pro kontrolu deklarovaných vlastností šroubů od různých dodavatelů. Zařízení by mělo umožňovat měření axiální síly u metrických šroubů M6, M8 a M10 včetně metodiky měření podle normy ISO16047 pro utahovací moment do 100 Nm. Dílčí cíle bakalářské práce:

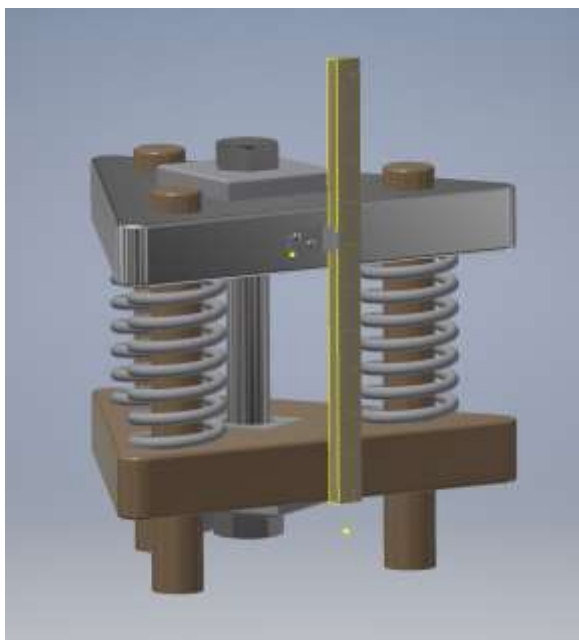
- Popsat metody a metodiky pro stanovení axiálních sil ve šroubových spojkách
- Vypracovat koncepční návrhy možných řešení
- Navrhnout metodiku měření
- Rozpracovat vybraný návrh do podoby výkresové dokumentace

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

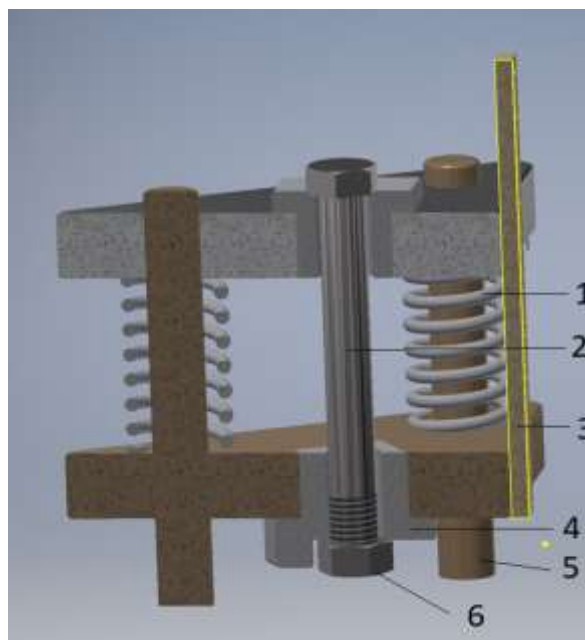
Následující koncepční řešení vycházejí z požadavků na výslednou konstrukci zařízení. Celkem byly vytvořeny 3 koncepty, které reprezentují odlišné možnosti měření, cenovou relaci a také přesnost měření. Výsledné řešení vychází z jednotlivých níže použitých konstrukčních prvků. Modely byly vytvořeny v programu Autodesk Inventor Professional 2017.

4.1 Řešení A

U prvního řešení jsou použity dvě litinové desky, které tvoří základní nosný rám konstrukce. Souosost během utahování je zajištěna pomocí tří vodících tyčí, které jsou součástí spodní podstavy. Jako prvek snímače síly jsou použity tři tlačné pružiny. Díky umístění pravítka lze měřit celkové stlačení pružin a tím nepřímo dopočítat axiální sílu ve šroubovém spoji díky předem známé tuhosti pružin. Variabilita zařízení je zajištěna výměnnými redukcemi pro různé průměry šroubů, přičemž na spodní straně je matice zaaretována pomocí tvaru redukce.



Obr. 23 Koncepční řešení A



Obr. 22 Řez aparaturou: 1-tlačná pružina, 2-testovaný šroub, 3-pravítko, 4-redukce, 5-spodní deska s vodícími tyčemi, 6-zkušební matice

Výhody

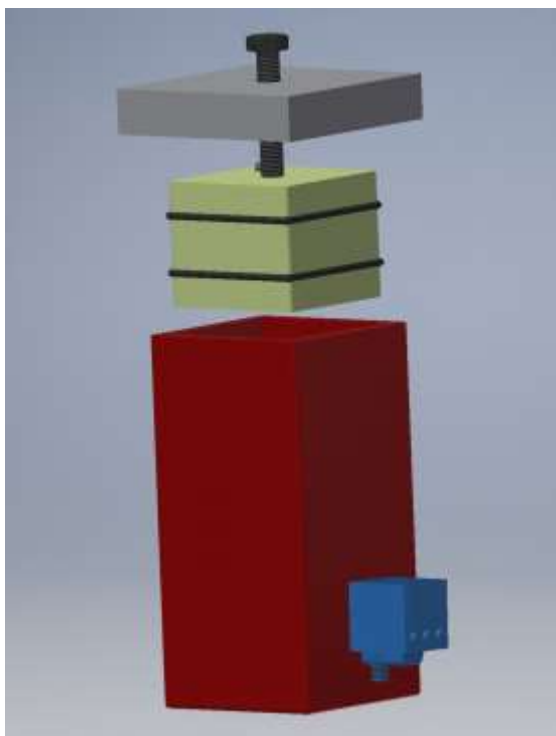
- cenově nenáročná konstrukce
- snadná obsluha měření
- jednoduchá konstrukce
- rozebíratelnost

Nevýhody

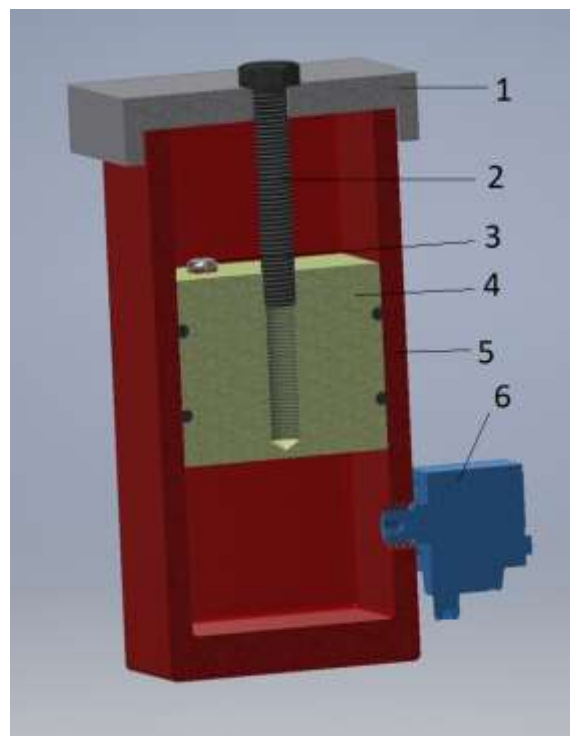
- nepřesné měření
- nutnost 3 pružin o stejné tuhosti
- nutnost nepřímo dopočítávat axiální sílu

4.2 Řešení B

Druhé koncepční řešení je založeno na zcela odlišném principu než varianta A. Konstrukce se skládá z válce, pístu a horní desky. Šroub prochází horní deskou a je šroubován do pístu. V prostoru pod pístem se nachází kapalina. Píst, jež v tomto řešení nahrazuje matici, musí mít z důvodu aretace vůči protočení čtvercový průřez. Dále je v něm umístěna díra pro potřebné odvzdušnění. Při utahování je píst vytahován nahoru a vytváří v kapalině podtlak. Tento podtlak je měřen podtlakovým snímačem ISE40A-01-N-L. Následně je opět nepřímo dopočítána hodnota axiální síly podle velikosti podtlaku a specifických vlastností použité kapaliny. Toto řešení má spíše více nevýhod jak výhod. Je to pouze koncept ukazující směr, kterým by se dalo pokračovat.



Obr. 24 Rozložení varianty B



Obr. 236 Řez konstrukcí: 1-opěrná deska, 2-testovaný šroub, 3-odvzdušňovací šroub, 4-píst, 5-válec s kapalinou, 6-podtlakový snímač

Výhody

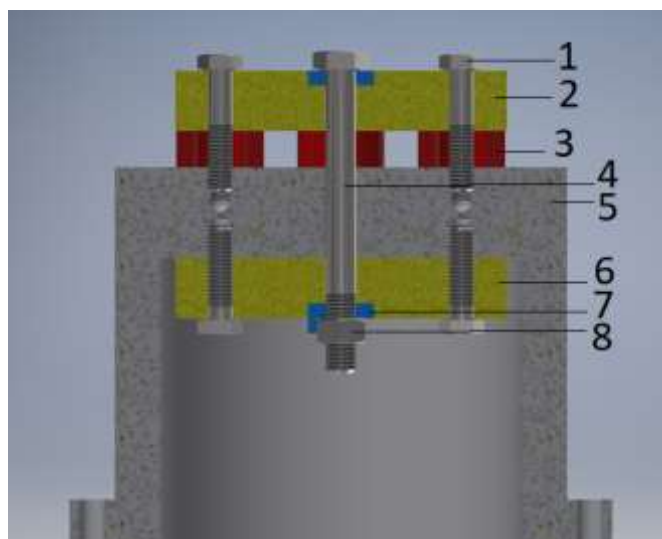
- délková variabilita testovaných šroubů
- nízká pořizovací cena
- jednoduchá konstrukce

Nevýhody

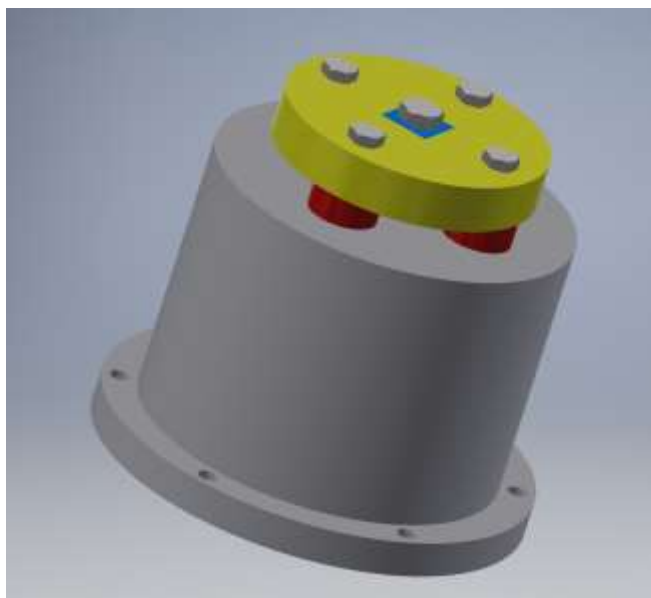
- vysoký požadavek na těsnost
- vysoké nároky na výrobu
- nepřesnost měření
- nutnost nepřímo dopočítávat axiální sílu

4.3 Řešení C

Třetí varianta se nejvíce blíží realitě. Základní rám tvoří příruba, na kterou je umístěna horní a spodní zátěžná deska. Variabilita velikostí testovaných šroubů je zajištěna opět výměnnými redukcemi s aretací zkušební matice. Jelikož nebylo specifikováno prostředí, ve kterém se bude zařízení nacházet, tak coby snímač síly byla zvolena siloměrná piezoelektrická podložka PACEline CFW s měřícím rozsahem 0–140 kN od společnosti HBM, jež dokáže měřit v širokém teplotním rozsahu. [18] Pro větší možnosti měření a eliminaci nežádoucích odchylek jsou zvoleny celkem 4 kusy. Díky kruhovému rozložení podložek je možnost změřit odchylky z důvodu odlišné rovinnosti ploch. Pro předepnutí podložek je použito 8 ks šroubů M8. Tyto šrouby slouží i jako vodící tyče vrchní zátěžné desky. Kvůli eliminaci tření na povrchu šroubu by měl mít leštěné stykové plochy. Signál z podložek je zesilován pomocí ústředny MX440B. Celkové vyhodnocení a sběr dat probíhá v softwaru Catman EASY, který plně podporuje výše použité součásti.



Obr. 25 Řez konstrukcí: 1-předepínací šrouby M8, 2-horní deska, 3-piezoelektrický snímač CFW, 4-měřený šroub M10, 5-nosný rám, 6-spodní deska, 7-redukční podložka, 8-zkušební matice



Obr. 27 Konceptní řešení C s piezoelektrickými snímači

Výhody

- přesnost měření
- software pro vyhodnocení dat
- variabilita testovaných šroubů

Nevýhody

- vysoká pořizovací cena
- vysoká hmotnost rámu
- špatná dostupnost obsluhy

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Konečné konstrukční řešení vychází z předchozí rešerše a z částí použitých prvků u předchozích koncepčních řešení. Způsobem měření se nejvíce podobá variantě C, systémem variability průměru šroubů variantě A - C. Konečná konstrukce je v rámci možností co nejvíce optimalizována pro snadnou výrobu. Výsledkem by měla být jednoduchá konstrukce splňující zadané parametry a co největší přesnost měření v rámci použitého řešení.

V následujících kapitolách jsou detailně popsány jednotlivé části konstrukce včetně kontroly.

5.1 Teoretický výpočet

Teoretický výpočet potřebného utahovacího momentu a velikosti axiální síly pro zvolení velikosti měřicích snímačů s dostatečnou rezervou. Výpočet je vztažen k největšímu šroubu ze zadání M10 x 1,5 v délce 60 mm a pevnostní třídy 10.9.

5.1.1 Výpočet síly předpětí

Předpětí ve spoji by mělo být co nejvyšší, ale nemělo by dojít k překročení meze kluzu při působení provozní síly.

Zkušební zatížení F_p je dáno vztahem:

$$F_p = A_s \cdot S_p \quad (16)$$

$$F_p = 58 \text{ mm} \cdot 830 \text{ MPa} = 48\,140 \text{ N}$$

Pro rozebíratelná spojení a opakovaně používané součásti se doporučuje:

$$F_i = 0,75 \cdot F_p = 36\,105 \text{ N} \quad (17)$$

Pro trvale nerozebíratelná spojení je doporučováno:

$$F_i = 0,90 \cdot F_p = 43\,326 \text{ N} \quad (18)$$

Maximální teoretická síla předpětí je:

$$F_i = R_e \cdot A_s = 900 \text{ MPa} \cdot 58 \text{ mm}^2 = 52\,200 \text{ N} \quad (19)$$

V následující výpočtech je uvažováno trvale nerozebíratelné spojení s maximální hodnotou předpětí $F_i = 43,326 \text{ kN}$

název veličiny	značka	hodnota
síla předpětí	F_i	43 326 N
střední průměr závitu	d_2	9,026 mm
dynamicky součinitel tření	f	0,1
rozteč závitu	P_h	1,5 mm
úhel profilu	α	60°

Tab. 1 - Tabulka použitých veličin a jejich hodnoty

5.1.2 Teoretický utahovací moment

Pro výpočet teoretického utahovacího momentu a dalších níže uvedených vzorců jsou použity veličiny uvedené v tabulce č. 1.

Potřebný moment pro překonání tření v závitech a dostatečnému utažení se vypočítá ze vztahu (9):

$$M_{ZV} = \frac{F_i d_2}{2} \left(\frac{P_h \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) + \pi f d_2}{\pi d_2 \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right) - f P_h} \right)$$

$$M_{ZV} = \frac{43,326 \text{ kN} \cdot 9,026 \text{ mm}}{2} \left(\frac{1,5 \text{ mm} \cdot \cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right) + \pi \cdot 0,1 \cdot 9,026 \text{ mm}}{\pi \cdot 9,026 \text{ mm} \cdot \cos\left(\frac{60^\circ}{2}\right) - 0,1 \cdot 1,5 \text{ mm}} \right)$$

$$M_{ZV} = 33,124 \text{ Nm}$$

K tomuto momentu je nutné přičíst odpor, který vzniká pod hlavou šroubu (11):

$$M_o = \frac{F_i \cdot f_0}{2} \cdot \frac{D + d}{2}$$

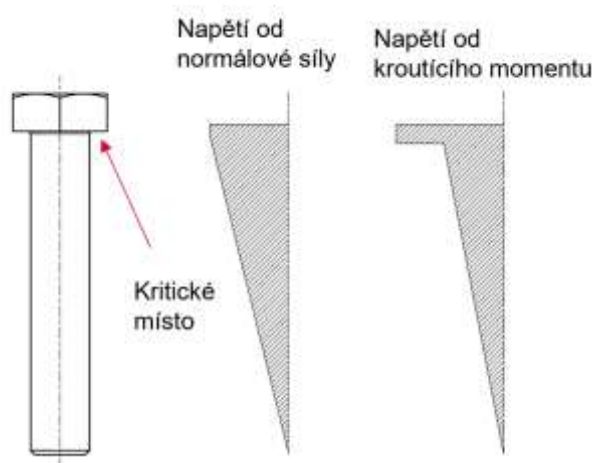
$$M_o = \frac{43,326 \text{ kN} \cdot 0,1}{2} \cdot \frac{17,77 \text{ mm} + 11 \text{ mm}}{2} = 34,16 \text{ Nm}$$

Při výpočtech M_{ZV} a M_o byl uvažován stejný součinitel tření. Celkový potřebný utahovací moment je dán vztahem:

$$M = M_o + M_{ZV} = 33,124 \text{ Nm} + 34,16 \text{ Nm} = 67,284 \text{ Nm}$$

5.1.3 Kontrola šroubu

Šroub je nejvíce zatěžován během procesu utahování, kdy je vystaven působením krutu a tahu. Na Obr. 28 jsou vyobrazeny výsledné vnitřní účinky, kterými je šroub podroben během montáže. Nejkritičtější místo se nachází těsně po hlavou šroubu. Toto místo je dále zkontrolováno k meznímu stavu pružnosti.



Obr. 26 Výsledné vnitřní účinky při utahování

Normálové napětí způsobené silou předpětí:

$$\sigma = \frac{F_i}{A_s} = \frac{43\,326 \text{ N}}{58 \text{ mm}^2} = 747 \text{ MPa} \quad (20)$$

Napětí způsobené kroutícím momentem překonávající pouze tření v závitech:

$$\tau_k = \frac{16 \cdot M_{ZV}}{\pi \cdot d_3^3} = \frac{16 \cdot 33,124 \text{ Nm}}{\pi \cdot 8,16 \text{ mm}^3} = 374,074 \text{ MPa} \quad (21)$$

Výsledné redukované napětí podle teorie HMM:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau_k^2} \quad (22)$$

$$\sigma_{red} = \sqrt{(747 \text{ MPa})^2 + 3 \cdot (374,074 \text{ MPa})^2} = 920 \text{ MPa}$$

Hodnota bezpečnosti v kritickém místě k meznímu stavu pružnosti je:

$$k_k = \frac{R_e}{\sigma_{red}} = \frac{940 \text{ MPa}}{920 \text{ MPa}} = 1,02 \quad (23)$$

Z výsledné hodnoty bezpečnosti vyplývá, že šroub přenesení dané zatížení.

5.2 Tenzometrický snímač

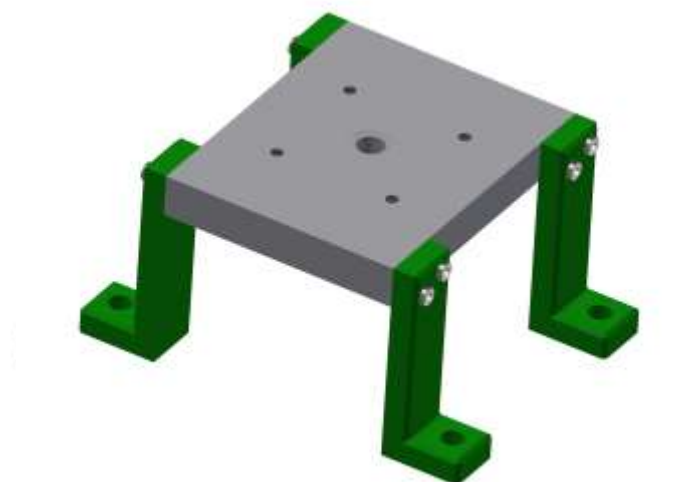
Jako snímač osových sil byla zvolena siloměrná podložka KMR - 60 kN od výrobce HBM. Tato podložka je doporučována přímo výrobcem pro měření axiálních sil šroubových spojů. Jelikož v zadání nejsou specifikovány okolní podmínky, za kterých probíhá měření, předpokládáme umístění konstrukce uvnitř haly. Tenzometr je zabezpečen stupněm krytí IP67, tedy kompletní ochrana vůči vniknutí prachu. Kabel je namontován napevno. Maximální velikost axiální síly, kterou je snímač schopen změřit, je 60 kN. [32] Podložka je tedy dostatečně dimenzována. Pro správnou funkci podložky je důležité dostatečné vystředění kolem měřeného šroubu. To je zajištěno vyfrézováním drážky na vrchní straně rámu a spodní straně desky. Jelikož snímač je zatížen pouze axiální silou, a nikoliv točivým momentem, takže není nutné zajištění proti rotačnímu pohybu. Katalogová cena je 18 117 Kč.



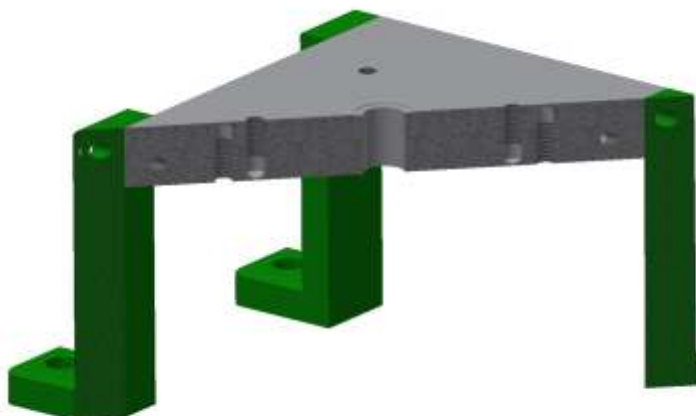
Obr. 30 Siloměrná podložka KMR do 60 kN [32]

5.3 Nosný rám

Rám tvoří čtyři podpěry přišroubovány k nosné desce šrouby s vnitřním šestihranem M5. Pro ukotvení konstrukce jsou nohy opatřeny otvory pro šroub M8. Podpěry umožňují dostatečný prostor a dobrý přístup ke spodní části nosné desky. Uprostřed desky se nachází průchozí otvor pro zkušební šroub. Velmi důležité je zahloubení uprostřed v místě uložení tenzometru kvůli vystředění. Okolo díry jsou z každé strany čtyři díry se závity M6 pro upevnění opěrných desek.



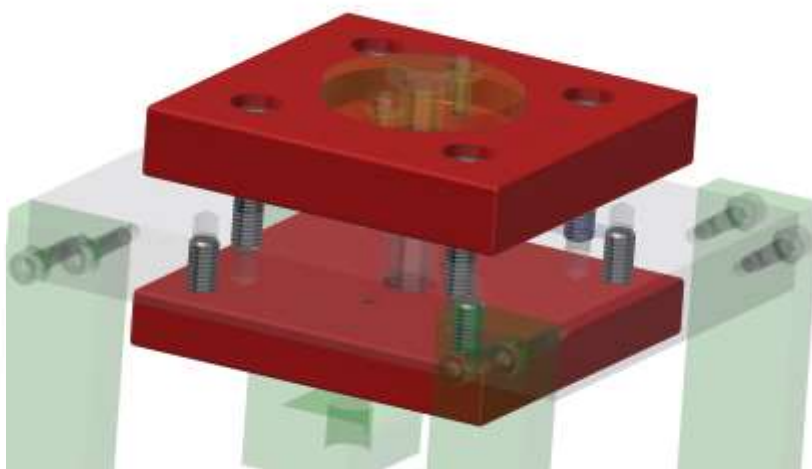
Obr. 27 Pohled na základní nosný rám tvořený 4 podpěrami



Obr. 28 Detail řezu rámu

5.4 Opěrné desky

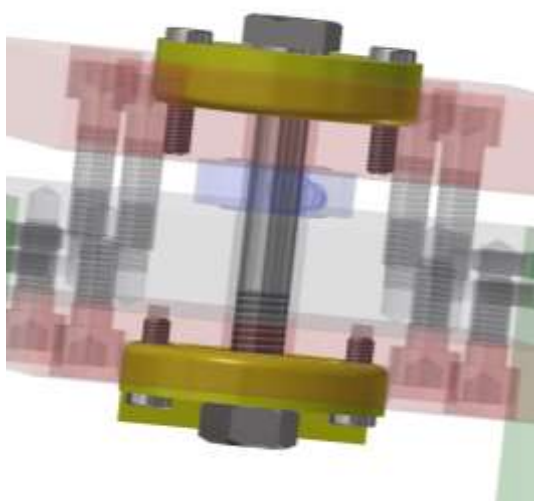
Ve vrchní a spodní části rámu se nachází opěrné desky. Uprostřed každé z nich se nachází zahloubení kruhového průřezu, uvnitř kterých jsou uloženy redukce. Obě desky jsou upevněny imbusovými šrouby M6, které zároveň plní funkci vodících čepů a přenáší utahovací moment do nosného rámu. Vrchní deska slouží k předepnutí tenzometrické podložky a případnou její kalibraci. V místě dotyku tenzometru je rovněž kruhové zahloubení pro vystředění. Velký důraz je kladen na rovnoměrné zatížení tenzometru, důležitá je tedy přesnost výroby. Kromě uložení redukce s aretační matice je spodní deska navržena pro případné nadstavení a zvýšení variability délky měřených šroubů.



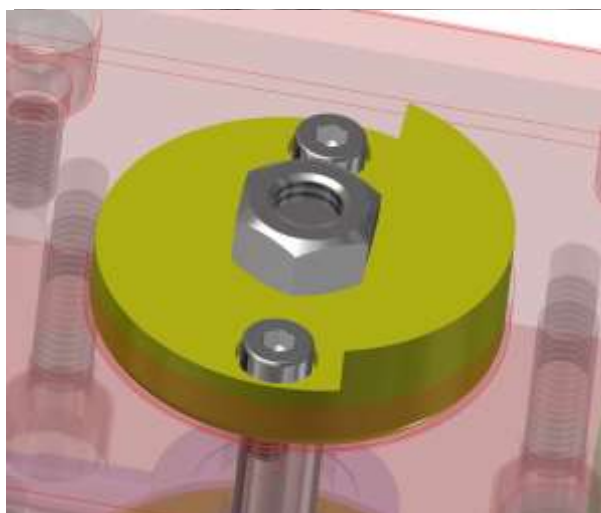
Obr. 29 Umístění opěrných desek, včetně předepínacích šroubů M6

5.5 Redukční podložky

Pro zajištění variability požadovaných měřených průměrů šroubů je použito řešení formou výměnných redukcí. Pro každý průměr šroubu je použita odpovídající sestava redukcí. Pro splnění podmínky normy ISO 16047 je spodní redukce opatřena výstupkem Obr. 33, aby nedocházelo k rotaci matice během utahování. Redukce jsou zapuštěny uvnitř opěrných desek s výškovým přesahem pro snadnou demontáž a výměnu. Jelikož redukce je v přímém styku se zkoušeným šroubem, musí být kalená s minimální tvrdostí 50 HRC, drsností nepřevyšující $R_a\ 0,5 \pm 0,3$, bez povrchové úpravy a bez povlaku. Pro lepší vyrobiteľnost byl zvolen válcovitý tvar redukcí. Jelikož redukce musí přenést třecí moment, tak aby se neprotáčely byl zvolen způsob aretace pomocí šroubů M4 upevněných v opěrných deskách.



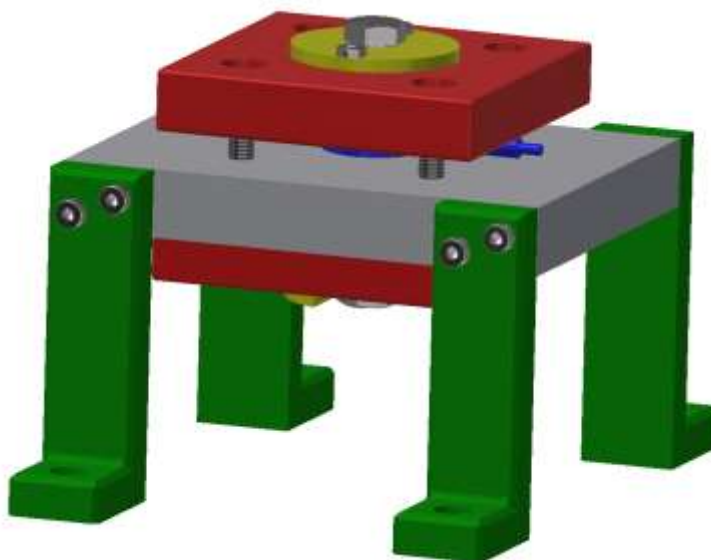
Obr. 31 Umístění redukčních podložek



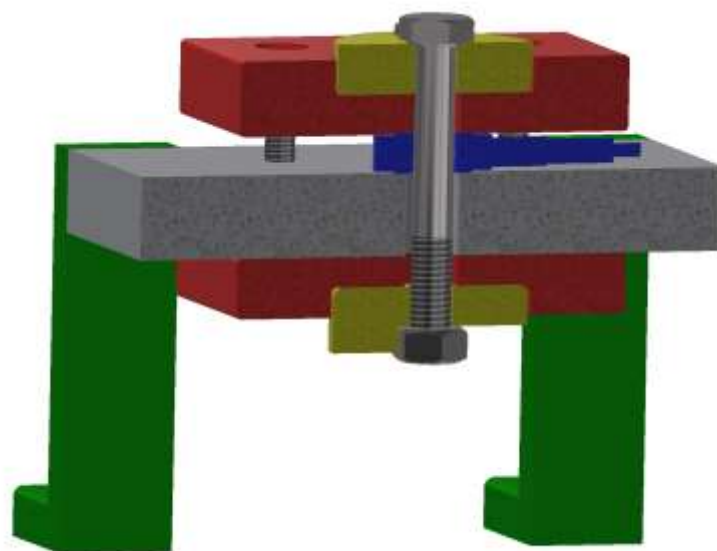
Obr. 30 Zajištění matice proti rotaci

5.6 Konečná konstrukce

Konečná konstrukce vychází z požadavku na testování šroubů různých průměrů a délek. Umožňuje jednoduchou a přístupnou obsluhu.



Obr. 32 Pohled na výslednou sestavu



Obr. 33 Detailní pohled řezem

5.7 Způsob utahování

Z důvodu zachování jednoduchosti konstrukce a teoreticky spočítaného maximálního utahovacího momentu 67,5 Nm navrhují způsob utahování pomocí momentového klíče. Vybraný digitální momentový klíč DIW-120M umožňuje dotahování momentem až 120 Nm, takže odpovídá našim požadavkům. Výrobce udává přesnost je $\pm 0,5\%$. Na digitálním displeji je zobrazován okamžitý utahovací moment a klíč má přímý výstup na počítač pomocí USB připojení. [33]



Obr. 34 Digitální momentový klíč DIW-120M [33]

5.8 Postup a metodika měření

Metodika měření předpokládá již složenou a upevněnou konstrukci, připojený snímač axiální síly KMR vedený přes zesilovač spolu s momentovým klíčem do počítače s vyhodnocovacím softwarem. Minimální délka testovaného šroubu je 60 mm. Měření probíhá za pokojové teploty 25 °C.

Sestavení měřicí aparatury

Podle průměru testovaného šroubu se použije sestava redukčních podložek odpovídající průměru měřeného šroubu. Stykové plochy těchto podložek se odmastí vhodným roztokem (aceton, technický benzin). Podle Obr.39 upevníme tyto podložky (1) do opěrných desek (2) pomocí 4 ks šroubů s vnitřním šestihranem M4 (3) s utahovacím momentem 2,9 Nm [34].

Příprava a upevnění šroubu

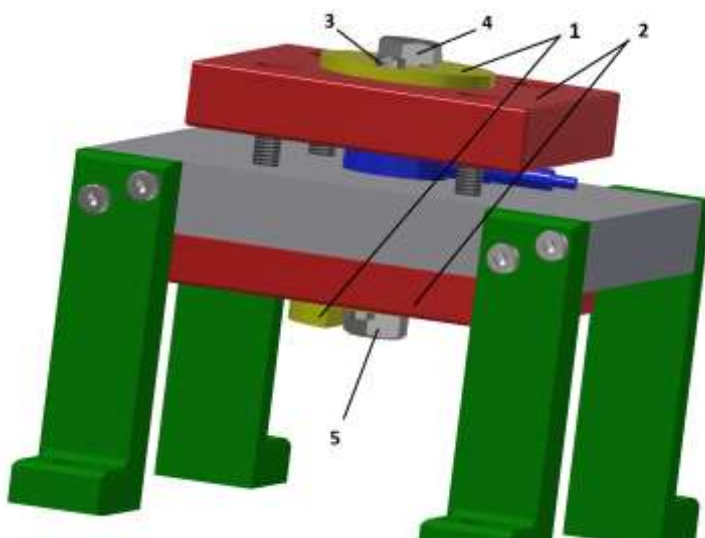
Testovaný šroub (4) odmastíme pomocí vhodného roztoku (aceton, technický benzin) a provlečeme z vrchní strany redukční podložkou (1). Na šroub nasadíme testovací matici (5). Tato matice musí být rovněž odmaštěna a zbavena mazacího tuku. Pro šroub třídy pevnosti 10.9 a nižší se použije matice třídy pevnosti 10. Pro šroub třídy pevnosti 12.9 je použita matice třídy 12. Z důvodu zajištění opakovatelnosti smí být testovací matice použita pouze jednou.

Proces utahování

Utahování šroubu probíhá ručně pomocí digitálního momentového klíče DIW-120M do maximálního momentu 115 Nm.

Vyhodnocení

Pro správné vyhodnocení naměřených dat je nutné otestovat nejméně 2 ks šroubů z dané výrobní šarže.



Obr. 39 Popis metodiky

6 DISKUZE

Byly vytvořeny tři koncepční návrhy reflektující různé cenové hladiny. U koncepčního řešení A se jedná o nejlevnější konstrukci pro použití v domácích podmínkách, tomu také odpovídá výsledná přesnost zařízení. Varianta B je spíše experimentální návrh fungující v teoretické rovině. Toto řešení má zatím spíše více nevýhod jak pozitiv. Třetí řešení nejvíce odpovídá daným požadavkům na konstrukci a přesnost. Katalogová cena 4 ks piezoelektrických podložek CFW, zesilovače MX440B a vyhodnocovacího softwaru Catman EASY přesahuje částku 300 000 Kč, tudíž je cena mimo akceptovatelnou hranici.

Výsledné konstrukční řešení vychází z části koncepční varianty C, avšak na úkor přesnosti a ceny je použit pouze jeden snímač axiální síly. Při návrhu konstrukce bylo předpokládáno umístění aparatury uvnitř haly, tedy mimo vysoké teplotní rozdíly a povětrnostní vlivy. Teoretickým výpočtem maximální axiální síly byla vybrána vhodná siloměrná podložka KMR do 60 kN. Nosný rám byl rovněž optimalizován s ohledem na snadnou dostupnost obsluhy a nižší výrobní požadavky. Předepnutí šroubů M6 by nemělo být vysoké, jelikož může nastat stav, kdy již po předepnutí vrchní opěrné desky je překročen měřicí rozsah siloměrné podložky. Nepřesnost měření může vzniknout třením na styku předepínacích šroubů M6, které slouží jako vodící tyče, a horní opěrné desky. Při utahování se deska stlačuje a vzniká nežádoucí odpor proti pohybu. Tento jev lze do značné míry eliminovat vhodnou úpravou šroubů ke snížení drsnosti povrchu. Pro utahování testovaného šroubu byl zvolen digitální momentový klíč DIW-120M umožňující okamžitý přenos dat do počítače, ale i zobrazení hodnoty utahovacího momentu na vestavěném displeji. Momentový klíč byl vybrán pro malé průměry šroubů a nepřiliš vysoké hodnoty utahovacího momentu. V této části by bylo žádoucí vytvořit vhodný software pro zpracování a vykreslení dat. Software by měl umožňovat zálohu naměřených hodnot a protokolů pro porovnání opakovatelnosti jednotlivých měření nebo pro další statistické zpracování vyhodnocených dat. Další možností je pouhé zobrazení velikosti axiální síly na digitálním převodníku [14] pro předem nastavenou hodnotu utahovacího momentu na momentovém klíči.

Po drobné úpravě konstrukce, tj. výměně vrchní redukce za axiální ložisko, by bylo možné měřit třecí moment v závitu.

Vytvořená metodika měření co nejvíce zjednodušuje obsluhu zařízení a eliminuje nepřesnost měření vnesenou lidským faktorem.

7 ZÁVĚR

Cílem této bakalářské práce byl návrh měřicí aparatury pro měření axiální síly ve šroubových spojích nalézající uplatnění v technické praxi. Pro návrh konstrukce byla vypracována rešerše chování šroubů, včetně faktorů ovlivňujících průběh měření, a popis existujících měřicích zařízení. Dále byl vypracován přehled současných metod měření.

Z vytvořených koncepčních řešení byly použity jednotlivé prvky pro model výsledného konstrukčního řešení. Z důvodu optimalizace výroby byly podpěrné nohy rámu odděleny a jejich spoj s nosnou deskou rámu řešen pomocí šroubového spoje. Pro zajištění totožných podmínek při měření různých průměrů šroubů byly použity výměnné redukční podložky s aretací matice. Jako snímač axiální síly byla zvolena tenzometrická podložka vyhovující teoreticky vypočteným požadavkům na zatížení s dostatečnou rezervou. Celá aparatura je navrhována pro možnost měřit i delší šrouby pomocí vloženého mezikusu pro nastavení spodní desky. Snahou bylo navrhnout výslednou konstrukci se zřetelem na optimalizaci výroby a snadnou obsluhu. Výstupem je vytvořený postup měření navazující na navrhnutou konstrukci.

Před uvedením do praxe je nutné propojit měřicí aparaturu se softwarem, který by dokázal zpracovat naměřená data, vést databázi s historií měření a vykreslit křivku zatížení podle zadaných parametrů. Tato část však nebyla součástí práce a pro svou složitost by se mohla stát navazujícím tématem pro další práci.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Archimedes' screw. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Archimedes%27_screw
- [2] Významný objev Archimédovy knihy. Pomohla moderní technika. In: Věda a vesmír/inStory.cz [online]. 2018 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <https://veda.instory.cz/objevy/534-vyznamny-objev-archimedovy-knihy-pomohla-moderni-technika.html>
- [3] Adapting Technology. Harry Ransom Center [online]. Copyright © 2000 Dale Guild Type Foundry [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://www.hrc.utexas.edu/educator/modules/gutenberg/invention/adapting/>
- [4] Information on Screw Threads: Historical Background. In: Bolt Science [online]. Bolt Science Limited, 2018 [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.boltscience.com/pages/screw2.htm>
- [5] Screw thread. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Screw_thread
- [6] Školní výukové materiály. [online]. 2019 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.moodle-trebesin.cz/pluginfile.php/11179/mod_resource/content/1/Spojovac%C3%AD%20sou%C4%8D%C3%A1sti%20a%20spoje.pdf
- [7] Threading (manufacturing). In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-04-13]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/Threading_\(manufacturing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Threading_(manufacturing))
- [8] VTS Zlín [online]. b.r. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: <http://www.vtsz.cz/>
- [9] Odporové tenzometry – princip, provedení, použití, historie. In: Automatizace.HW.cz [online]. 2017 [cit. 2019-03-24]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/foliove-odporove-tenzometry-princip-provedeni-pouziti-historie.html>
- [10] VLK, M., L. HOUFEK, P. HLAVOŇ, P. KREJČÍ, V. KOTEK a J. KLEMENT. VUT V BRNĚ, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ. Experimentální mechanika: Skriptum. Brno, 2003. Dostupné také z: http://ean2011.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/Experimentalni_mechanika.pdf

- [11] ŠKARABELOVÁ, L. Piezoelektrina v technické praxi [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2016. 49 s. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Jiří Kazelle, CSc..
- [12] sSquirter® DTIs | Applied Bolting Technology Products. Applied Bolting Technology Products [online]. Copyright ©2016 Applied Bolting Technology via [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.appliedbolting.com/squirters>
- [13] DTI SmartBolts. SmartBolts [online]. 2019 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://www.smartbolts.com/dti/>
- [14] Utilcell | Snímače sil – Load cells – Celulas de carga. UWT 6008 | Utilcell. [online]. 2019 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <https://www.utilcell.com/elektronika/uwt-6008/>
- [15] Torque Testers. Mark - 10 [online]. 2019 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: http://mark-10.com/instruments/testsys/torque%20tester.html?gclid=Cj0KCQiAxNnfBRDwARIsAJIH29CqG3TKRwNuRioqWf3QNky6U6xvulZnIW36EyYE9UNnyMZ5gztmKS0aAtnIEALw_wcB
- [16] Torsion Testing Machine fasteners torque testing 10000Nm M12-M56 ETT104A [online]. 2019 [cit. 2019-04-27]. Dostupné z: <http://www.tensile-testingmachine.com/sale-10215250-iso16047-standard-bolt-torque-testing-machine-fastener-testing-equipment-1800kg.html>
- [17] SVOBODA, P.; ZIMMERMAN, M.: Měřicí aparatura; Konstrukce přípravku pro studium axiálních sil ve šroubech [online]. 2019 [cit. 2019-02-11] Dostupné z: http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1851
- [18] HBM měřicí technika s.r.o. [online]. b.r. [cit. 2019-04-01]. Dostupné z: <http://www.hbm.cz/>
- [19] Závity na kole. Bajk.cz [online]. 2004 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: http://www.bajk.cz/data/clanek_tisk.asp?id_clanek=566
- [20] Bolted Joint Analysis. MechaniCalc [online]. 2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <https://mechanicalc.com/reference/bolted-joint-analysis>
- [21] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE, Richard G. (Richard Gordon) BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTUM, 2010, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [22] NPS-5020 Online Bolt Torque Axial Force Testing Machine. HRJ [online]. 2019 [cit. 2019-04-16]. Dostupné z: <http://www.hrjtest.com/content/?430.html>

- [23] Automatic high strength bolt detector anti-slip coefficient tester high strength bolt test fixture [online]. Copyright © 2012 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.chinahao.com/product/546278470098/>
- [24] Squirter DTI Structural Washers. ALLFASTENERS [online]. 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.allfasteners.com.au/squirter-dti-structural-washers>
- [25] UT PRO MĚŘENÍ PŘEDPĚTÍ VE ŠROUBECH. Energoservis [online]. 2008 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.defektoskopie.cz/produkty/ut-ultrazvuk/ultrazvuky-specializovane/ut-pro-mereni-predpeti-ve-sroubech/>
- [26] TONA EXPERT 1/2 momentový klíč 70-350 Nm. Rucni-naradi [online]. 2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <https://www.rucni-naradi.cz/tona-1-2-momentovy-klic-70-350-nm>
- [27] HYDRAULIC TORQUE WRENCH [online]. 2019 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: <http://www.nibtorque.com/id27.html>
- [28] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Jiří DVOŘÁČEK. Základy konstruování. Doplněné vydání. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2016, 230 stran: ilustrace. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [29] Ústav konstruování [online]. [cit. 2019-03-08]. Přednáška - Pohybové a spojovací šrouby. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/443638/mod_resource/content/3/5KS_Prednaska_5_nahled.pdf
- [30] WALDA, F., et al. K utahování šroubů třecích spojů. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební [online]. [2019] [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: [http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20\(Pdf\)/22_Wald_Utahovani_sroubu_W12.pdf](http://people.fsv.cvut.cz/~wald/Clanky%20v%20Adobe%20(Pdf)/22_Wald_Utahovani_sroubu_W12.pdf).
- [31] International Organization for Standardization ISO 16047:2005(E). Fasteners - torque/clamp force testing. Geneva, Switzerland; 2005.
- [32] KMR | HBM - měřicí technika. KMR | HBM – měřicí technika [online]. Hottinger Baldwin Messtechnik, 2019 [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <https://www.hbm.cz/produkty/snimace-sily/kmr/>
- [33] Digitální momentový klíč model DIW. Natis [online]. 2019 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.natis.cz/momentove-klice-meridla-krouciciho-momentu/digitalni/det/6/35/76/679/0>
- [34] Domů Heyman [online]. 2019 [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: https://www.heyman.cz/media/useruploads/files/cz/technische_angaben/utahovac%C3%AD_momenty.pdf?f=1

[35] TANIGUCHI, H., & YAMANE, K. Method and instrument for measuring bolt axial force (2008). Japanese, Patent No. JP2010117334A Japan Patent Office, [cit. 2019-5-10]. Dostupné z:
<https://patents.google.com/patent/JP2010117334A/en?q=axial&q=force&q=bolt&q=torque&q=machine&oq=axial+force+bolt+torque+machine>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

P_h	[mm]	Rozteč
D, d	[mm]	Velký průměr závitu
D_1, d_1	[mm]	Malý průměr závitu
D_2, d_2	[mm]	Střední průměr závitu
d_3	[mm]	Malý průměr vnějšího závitu
α	[°]	Úhel profilu závitu
ε	$\mu m/m$	Poměrné prodloužení
σ	[MPa]	Mechanické napětí
E	[MPa]	Youngův modul pružnosti
U_V	[V]	Výstupní napětí
I_s	[A]	Vstupní proud
R_{1-4}	[Ω]	Odpor
δ	[mm]	Prodloužení
F_i	[N]	Síla předpětí
S	[mm ²]	Obsah průřezu
l	[m]	délka
M_{ZV}	[Nm]	Utahovací moment
F_X	[N]	Síla v ose X
F_Y	[N]	Síla v ose Y
N	[N]	Normálová síla
f	[-]	Součinitel tření
F_{ZV}	[N]	Utahovací síla
M_o	[Nm]	Moment tření pod hlavou šroubu
f_0	[-]	Součinitel tření na dosedací ploše
A_s	[mm ²]	Výpočtový průřez šroubu
S_d	[mm ²]	Plocha průřezu válcové části bez dříku

l_b	[mm]	Délka části dříku se závitem nacházející se v sevření
l_g	[mm]	Délka válcové části dříku bez závitu
k_s	$[kN \cdot mm^{-1}]$	Tuhost šroubu
C	[-]	Tuhostní konstanta spoje
k_p	$[kN \cdot mm^{-1}]$	Tuhost spojovaných součástí
F_s	[N]	Síla ve šroubu v provozním stavu
F_p	[N]	Síla ve spojovaných součástech
δ_s	[mm]	Deformace šroubu
δ_s	[mm]	Deformace spojovaných součástí
S_p	[MPa]	Zkušební napětí
τ_k	[MPa]	Smykové napětí
σ_{red}	[MPa]	Redukované napětí
k_k	[-]	Součinitel bezpečnosti
R_e	[MPa]	Mez kluzu

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Archimedův šroub [2]	14
Obr. 2 Starověký lis na olej [3]	14
Obr. 3 Přehled druhů šroubových spojů [28]	15
Obr. 4 Přehled vybraných závitů [28]	16
Obr. 5 Základní terminologie závitu [21]	17
Obr. 6 Průběh vláken [29]	18
Obr. 7 Tvarová a délková variabilita měřicí mřížky [10]	19
Obr. 8 Wheatstonův můstek napájený konstantním napětím [10]	21
Obr. 9 Momentový klíč [26]	23
Obr. 10 Hydraulický utahovák [27]	23
Obr. 11 Pneumatický utahovák [27]	24
Obr. 12 Squirter DTI podložky [12]	25
Obr. 13 Schéma šroubů SmartBolts [13]	25
Obr. 14 Rozbor působících sil při utahování [21]	26
Obr. 15 Poměr složek utahovacího momentu [30]	28
Obr. 16 Pracovní diagram předepjatého šroubového spoje a provozní síly [21]	30
Obr. 17 Zkušební aparatura Model TSTM-DC [15]	32
Obr. 18 Stroj Wance ETT104A [16]	33
Obr. 19 Přípravek pro měření šroubů M20, M30 a M42 [17]	34
Obr. 20 NPS-5020 včetně příslušenství [22]	34
Obr. 21 Měřicí sestava včetně vyhodnocovacího počítače [23]	35
Obr. 22 Patent pro měření axiální síly ve šroubu [35]	36
Obr. 23 Koncepční řešení A	38
Obr. 24 Řez aparaturou A	38
Obr. 25 Rozložení varianty B	39
Obr. 356 Řez konstrukcí B	39

Obr. 27 Koncepční řešení C s piezoelektrickými snímači	40
Obr. 28 Řez konstrukcí C.....	40
Obr. 29 Výsledné vnitřní účinky při utahování	44
Obr. 30 Siloměrná podložka KMR do 60 kN [32]	44
Obr. 31 Pohled na základní nosný rám tvořený 4 podpěrami.....	46
Obr. 32 Detail řezu rámu.....	46
Obr. 33 Umístění opěrných desek, včetně předepínacích šroubů M6.....	47
Obr. 34 Umístění redukčních podložek.....	48
Obr. 35 Zajištění matice proti rotaci	48
Obr. 36 Pohled na výslednou sestavu	48
Obr. 37 Detailní pohled řezem	49
Obr. 38 Digitální momentový klíč DIW-120M [33]	49
Obr. 39 Popis metodiky	49

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Tabulka použitých veličin a jejich hodnoty	43
---	----

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1	Sestava konstrukce	2019-BP-116304-1
Příloha č. 2	Kusovník	2019-BP-116304-11
Příloha č. 3	Podpěra	2019-BP-116304-2
Příloha č. 4	Nosná deska	2019-BP-116304-3
Příloha č. 5	Vrchní opěrná deska	2019-BP-116304-4
Příloha č. 6	Spodní opěrná deska	2019-BP-116304-5
Příloha č. 7	Vrchní redukce M6	2019-BP-116304-61
Příloha č. 8	Vrchní redukce M8	2019-BP-116304-62
Příloha č. 9	Vrchní redukce M10	2019-BP-116304-63
Příloha č. 10	Spodní redukce M6	2019-BP-116304-71
Příloha č. 11	Spodní redukce M8	2019-BP-116304-72
Příloha č. 12	Spodní redukce M10	2019-BP-116304-73
Příloha č. 13	Tenzometr	